

Возможности использования спутниковых измерений интегрального влагосодержания атмосферы для определения даты начала летнего муссона в Индии

А.Г. Головки¹, Д.М. Ермаков¹, А.В. Кузьмин¹

¹ Институт космических исследований РАН

1177997, Москва, Россия

E-mail: golovko01@mail.ru; d.m.ermakov@cosmos.ru.

В проведённом исследовании предложен новый подход к прогнозированию начала и развития южноазиатского летнего муссона в Индии на основе анализа пространственно-временных вариаций интегрального влагосодержания атмосферы (ИВА) по данным спутникового микроволнового радиометрического зондирования в летний период индийского муссона за 2012...2021 гг. для 11 регионов, окружающих Индию. В работе детально рассмотрен один регион. Применяются микроволновые радиометрические данные спутников SSMIS F16-F18 для получения ИВА. Далее по этим данным в ИКИ РАН была сформирована база глобальных ежедневных полей ИВА с 2012 по 2023 год. Для восстановления ИВА из данных SSMIS была использована технология искусственных нейронных сетей и методика подхода спутникового радиотепловидения. В результате были получены ежесуточные поля ИВА за 2012–2021 гг. по радиометрическим данным SSMIS F16–F18 каналов 1–18 с интервалом 3 ч на координатной сетке $0,25 \times 0,25^\circ$. Ошибочно спрогнозированное наступление муссона несёт большие экономические потери для страны с самым большим населением в мире. Рассчитанные шаблоны ИВА подтвердили исходную гипотезу о том, что поведение ИВА почти полностью подчинено внутригодовому смещению ВЗК. Такая предсказуемая динамика атмосферных процессов даёт возможность разрабатывать конкретные методы для прогнозирования даты начала летнего индийского муссона, который в дальнейшем может применяться к другим крупным регионам рядом с Индией.

Ключевые слова: глобальные поля интегрального влагосодержания атмосферы, летний индийский муссон, микроволновая радиометрия, спутниковое радиотепловидение

Opportunities of using precipitable water vapor satellite measurements for determining onset date of the Indian Summer Monsoon

A.G. Golovko¹, D.M. Ermakov¹, A.V. Kuzmin¹

¹ Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences

This study proposes a new approach for predicting the onset and development of Summer Monsoon in India, based on the analysis of spatiotemporal variations in precipitable water vapor (PWV) derived from satellite microwave radiometric sounding data during the summer monsoon period from 2012 to 2021 for 11 regions surrounding India. The paper examines one region in detail. Microwave radiometric data from the SSMIS F16–F18 satellites are used to retrieve PWV. Subsequently, a database of global daily PWV fields for 2012–2023 was generated at the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI RAS) using these data. For PWV retrieval from SSMIS data, an artificial neural network technology and a satellite radio-thermal vision approach were employed. As a result, daily PWV fields for 2012–2021 were obtained from radiometric data from SSMIS F16–F18 channels 1–18, with a 3-hour temporal resolution on a $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ spatial grid. An incorrectly predicted monsoon onset entails significant economic losses for the world's most populous country. The calculated PWV patterns confirmed the initial hypothesis that PWV behavior is almost entirely governed by the intra-annual displacement of the inter-tropical convergence zone. Such predictable dynamics of atmospheric processes enable the development of specific methods for forecasting the onset date

of the summer Indian monsoon, which can subsequently be applied to other major regions adjacent to India.

Keywords: global fields of precipitable water vapor, summer Indian monsoon, microwave radiometry, satellite radiothermography

Введение

Южноазиатский муссон – сезонное событие для ряда азиатских стран, имеющих выход к акваториям Тихого и Индийского океанам, разделяющим календарный год на сухой период и период интенсивных осадков. Размер каждого из 11 регионов (рис.1), выбранных субъективно, составляет $5 \times 5^\circ$ географических градусов. Над акваториями Аравийского моря, Бенгальского залива, Индийского океана располагаются 6 районов, а 5 районов расположены над сушей: над северо-западом Индии, на границе с Пакистаном и над севером вдоль Гималаев.

Используемые данные и их применение

Сравнивались данные ИВА и суммарно выпавших за каждые сутки осадков, взятых по реанализу ERA5 (англ. European Centre of Medium-range Weather Forecasts Reanalysis v.5). Сравнение показало, что во всех анализируемых районах наблюдается стандартная картина годового временного хода ИВА. Примерно с марта до начала муссона наблюдается возрастание ИВА, перед периодом дождей, затем ИВА выходит на квазипостоянные значения, «плато», и в течение этого периода фиксируются интенсивные дожди. После чего ИВА резко снижается, сопряженное с окончанием периода дождей. Такое характерное последовательное изменение значений ИВА может быть использовано в качестве шаблона для прогноза в каждом районе начала и окончания индийского муссона.

Кроме того, было отмечено, что начало существенных осадков по данным ERA5 и ИВА зачастую (в 82% случаев для всех регионов за 9 лет) опережает официальную дату начала муссона от Индийского метеорологического департамента (ИМД) (https://mausam.imd.gov.in/responsive/monsooninformation_onset.php) на 20-25 дней в южных районах над океаном и на 5-7 дней — в остальных. Это подчеркивает, что процесс насыщения атмосферы влагой начинается раньше, чем объявляет ИМД.

Есть основания полагать, что прогнозирование летнего индийского муссона можно экстраполировать на все регионы, а не ограничиваться одним штатом Керала. В таком случае, прогноз будет строиться на анализе текущих данных и сравнении их с многолетним шаблоном, рассчитанным для каждого региона.

В исследовании [1] сравнивалось ИВА в двух ключевых для индийского муссона акваториях. Так анализ проводился для квадратов $3 \times 3^\circ$: в северной части Бенгальского залива (с центром в точке 20° с.ш., $87,5^\circ$ в.д.) и для сравнения – в Аравийском море (с центром в точке 20° с.ш., $64,5^\circ$ в.д.). Результаты показали, что Бенгальский залив – зона аккумуляции влаги. С начала марта там фиксируется устойчивый рост ИВА со средним трендом $+0,33$ кг/м² в сутки. С наступлением муссона показатель стабилизируется на среднем многолетнем уровне $62,2$ кг/м² (за 2012–2021 гг.). Снижение ИВА относительно этого значения свидетельствует о завершении муссонного периода.

Также в работе [2] подробно описана процедура построения среднего шаблона для всех регионов с 2013-2021 гг., которые используются в настоящей работе для пробных подходов к прогнозированию муссонной циркуляции. Установленная в первой части вышеупомянутой статьи циклическая закономерность поведения поля ИВА с годовым смещением ВЗК в областях над Индией и акваториями Индийского океана, открыла возможности для дальнейшего изучения данного явления.

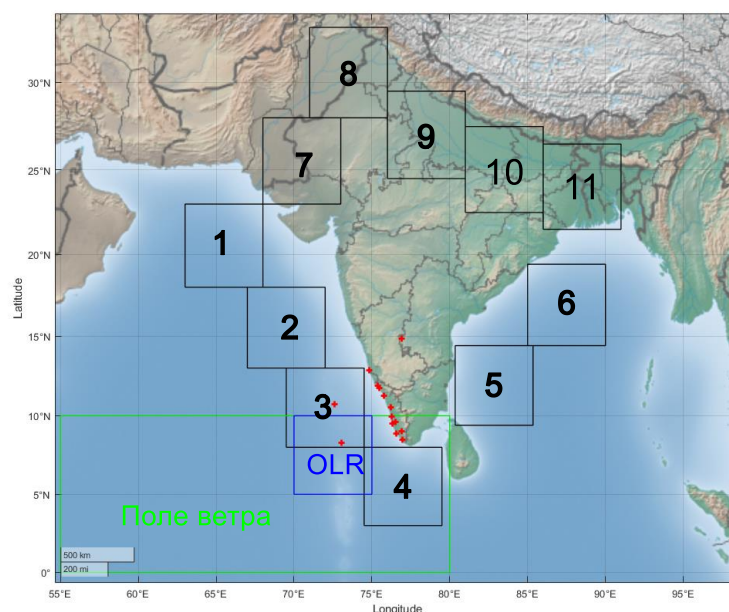


Рис. 1. 11 районов для анализа динамики полей ИВА (черные квадраты), красные кресты – индийские метеостанции, синий квадрат – район оценки OLR, зеленый прямоугольник – район оценки поля ветра

Расположение 8 региона во многом определяет хорошую базу для прогнозирования: самая северная континентальная часть Индии, заключенная между Гималаями на востоке и горной системой Каракорум на западе, имеет характерный годовой ход ИВА, в то время как 3, 4, 5 регионы более сложны.

Район 8 с центром в точке $30,5^{\circ}$ с. ш. и $73,5^{\circ}$ в. д. находится севернее района 7 над сушей около предгорья Гималаев. Вероятно, такое расположение и поступление холодных воздушных масс определяют наличие небольших по интенсивности осадков на протяжении почти всего сухого периода, в котором среднее ИВА составляло $23,7 \text{ кг/м}^2$. Начиная с 25-26 июня интенсивность осадков усиливается со значениями ИВА до $50\text{--}53 \text{ кг/м}^2$, в то время как по данным ИМД начало дождей пришлось на 2–3 июля. ERA5 определяет окончания периода дождей 2 сентября и значения ИВА в этот момент снижаются до 35 кг/м^2 и менее. Во время летнего муссона среднее значение ИВА составляет $48,3 \text{ кг/м}^2$. ИМД объявляет об окончании летнего муссона 15–27 сентября.

На основании выявленной циклической закономерности был предложен подход прогнозирования начала муссонных осадков с применением рассчитанного шаблона. В дальнейших исследованиях авторов предложена и реализована итерационная процедура, выполняющая расчет шаблона для каждого района (рис.2). В таблице 1 представлены даты начала муссонных осадков для 8 региона.

Таблица 1. Даты начала муссонных осадков по годам в рассмотренном районе

Год	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Max D
Район 8	3 июл	25 июн	29 июн	19 июн	25 июн	17 июн	25 июн	5 июл	23 июн	9 июл	22

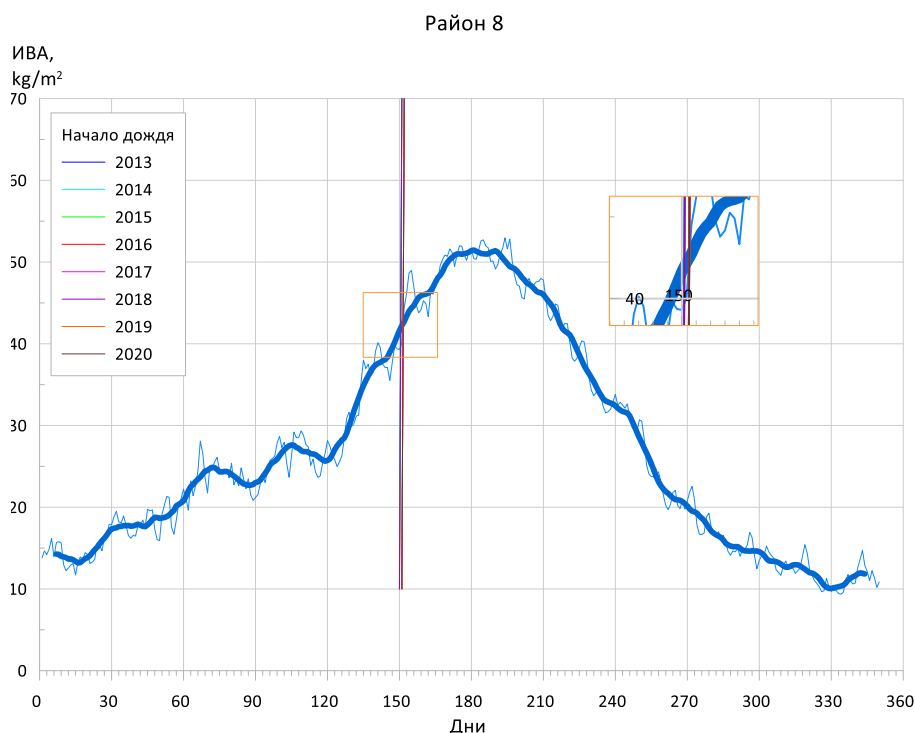


Рис.2. Шаблон ИВА (тонкая голубая линия) для района 8, полученный усреднением данных за 2013...2020 годы, и результат их сглаживания в окне 13 суток (толстая линия); вертикальными линиями показаны положения условных дат начала муссонных осадков

Коэффициенты корреляции между итоговым шаблоном района и данными соответствующих лет, по которым вычислялся шаблон, содержатся в Таблице 2.

Таблица 2. Корреляция шаблонов ИВА с данными за отдельные годы для 8 региона

Год	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Район 8	0,90	0,89	0,89	0,90	0,91	0,94	0,94	0,91

Как видно, временной ход ИВА повторяется из года в год практически неизменно, но с лагом по времени, который, по всей видимости, может быть обоснован межгодовыми вариациями региональной атмосферной циркуляции. Тогда становится необходимым рассмотреть данный процесс на предмет того, в каком интервале лежат даты начала летнего муссона за каждый год относительно определенной раннее даты на шаблоне.

С учётом временных сдвигов в Таблице 3 показаны отклонения предполагаемой даты начала муссонных осадков (см. Таблицу 1) за каждый год в 8 регионе относительно 150-х суток на шаблоне. Положительное значение отклонений означает, что дата начала муссона смещается на более позднюю дату, а отрицательное – на более раннюю.

Таблица 3. Отклонения предполагаемой даты начала муссонных осадков относительно 150-х суток

Год	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Среднее значение	Стандартное отклонение

Район 8	0	-1	0	-1	-1	0	-1	-1	-0,63	0,52
------------	---	----	---	----	----	---	----	----	-------	------

Выводы

Анализируя совокупность рассчитанных данных, можно с высокой долей вероятности утверждать, что для 8 региона существуют хорошие перспективы построения прогноза начала осадков в период летнего индийского муссона по описанному ранее алгоритму с точностью до 1 суток.

Работа выполнена в рамках государственных заданий Института космических исследований РАН («Мониторинг»).

Литература

1. Кузьмин А. В., Ермаков Д. М., Суровяткина Е. Д. и др. Исследование летнего индийского муссона в поле интегрального влагосодержания атмосферы по данным спутниковых микроволновых радиометров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 3. С. 292–306. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-292-306.
2. Кузьмин А.В., Ермаков Д.М., Головкин А.Г. Исследование летнего муссона близ полуострова Индостан в поле интегрального влагосодержания атмосферы по данным спутниковых микроволновых радиометров. Часть 1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 6. С. 219–233. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-365-379.